Uma Nova Estratégia de Roteamento para Redes Ópticas Elásticas Energeticamente Eficientes

Igor M. Queiroz, *Membro, IEEE*, Karcius D. R. Assis, Raul C. Almeida Jr.

***Resumo*—Este artigo apresenta uma nova estratégia de roteamento para redes ópticas elásticas, que considera a potência consumida pelos seus elementos físicos como restrição. Para isso, foi proposto um modelo matemático composto por duas partes: Roteamento e Alocação de Modulação e Espectro (R+MLSA). Utilizaram-se três diferentes heurísticas para o roteamento. Posteriormente, foi utilizado um algoritmo híbrido para a escolha da melhor heurística, baseado na relação de compromisso entre a utilização de espectro e o consumo de potência da rede. Os resultados mostram que esta abordagem provê uma ferramenta de análise eficiente para o planejamento de rede. Simulações foram feitas em redes pequenas e moderadas.**

Palavras-Chave*—*Redes ópticas elásticas, Economia de energia, Redes ópticas energeticamente eficientes, Roteamento modulação e alocação de espectro, Formulação MILP, Otimização.

Abstract—**This article presents a new routing strategy for elastic optical networks, which considers the power consumed by the physical elements as a constraint. The proposal is based on a mathematical modeling decomposed into two parts: routing and Spectrum and Modulation Format Assignment (R+MLSA). The routing part utilizes 3 different heuristics. Posteriorly, a hybrid algorithm is utilized to select the best heuristic, which is based on the trade-off between spectrum utilization and power consumption on network. Results show that this approach provides an efficient analysis tool for network planning. Simulations were held on small and moderate networks**

Keywords*—*Elastic optical networks, Energy saving, Green optical networks, Routing modulation and spectral assignment, MILP formulation, Optimization.

I. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento do tráfego de Internet tem mudado significativamente nossas vidas. A cada ano, a largura de banda utilizada nas comunicações aumenta [1]. Os sistemas de transmissão atuais, que utilizam a tecnologia convencional de multiplexação por divisão de comprimento de onda (Wavelength Division Multiplexing - WDM), não poderão atender essa demanda no futuro, pois possuem limitações para a utilização eficiente do espectro, uma vez que não permitem flexibilidade de alocação de banda. Para ilustrar este fato, basta observar que um sistema por divisão em comprimento de onda comercial com canais de 10 Gbps alocados a uma banda de 50 GHz apresenta uma eficiência espectral de apenas 0,2 bps/Hz (=10 Gbps / 50 GHz), ao passo que o Teorema de Shannon estabelece que essa eficiência poderia atingir valores de 7 bps/Hz em sistemas ópticos [2]. Dessa forma, pesquisas estão focadas no desenvolvimento de novas tecnologias para redes ópticas de alta velocidade, que, num futuro próximo, possam suportar transmissões na faixa de Tb/s. Neste contexto, recentemente, as redes ópticas elásticas (Spectrum Sliced Elastic Optical Path Networks - SLICE), também chamadas de redes ópticas de espectro eficiente, ou de grade flexível, têm se mostrado como uma alternativa promissora para proporcionar comunicação de alta velocidade [3]. Ao invés de utilizar canais de comprimento de onda fixo, como nas redes WDM, neste novo tipo de rede, a largura de banda possuirá espectro elástico para alocar a demanda de tráfego da camada superior [4]. Dessa forma, o espectro da fibra é tratado como um recurso flexível, o que possibilitará uma maior compactação e eficiência no uso do mesmo. Basicamente, o caminho óptico pode ser alocado em qualquer intervalo contínuo de frequência e deve ser separado de outros caminhos ópticos por uma banda de guarda, denomidada de Filter Guard Band (FGB) [5]. Para criar o caminho óptico para a demanda de tráfego utilizando várias sub-portadoras, a rede SLICE precisa empregar transponders de largura de banda variável (Sliceable Bandwidth Variable Transponders - SBVT) nas bordas da rede e comutadores ópticos de banda variável (Optical Crossconnects - OXC) no núcleo da rede, que podem ser construídos a partir de comutadores de comprimentos de onda seletivos (Wavelength Seletive Switches - WSS) [6]. Nos transceptores, o sistema de transmissão O-OFDM (Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing) permite que os dados sejam enviados em subportadoras ortogonais e os sinais de cada subportadora estendam-se para a adjacente, tal que o espectro seja bastante compactado [5].

No sistema WDM, é empregado o conceito de roteamento e alocação de comprimento de onda (Routing and Wavelength Assingment - RWA). Já na rede SLICE surge o conceito de roteamento e alocação de espectro (Routing and Spectrum Assingment - RSA), e consiste em achar a rota mais apropriada para cada par fonte-destino e alocar uma fração contígua do espectro de frequências para atender o tráfego requerido [7]

Somado a isso, pode-se utilizar o conceito de modulação adaptativa baseada em restrições relacionadas ao limite de ruído de emissão espontânea. Essa estratégica foi proposta originalmente por [6]. Além disso, recentemente, pesquisas têm sido feitas com foco na sustentabilidade das redes SLICE e em seus custos operacionais, surgindo o conceito de redes ópticas elásticas verdes [8-13]. Neste contexto, em [2] foi proposto um algoritmo que considera o consumo de energia pelos elementos físicos da rede, quais sejam os OXCs, SBVTs e amplificadores ópticos e utiliza os conceitos de roteamento, nível de modulação, e alocação de espectro (Routing, Modulation Level and Spectrum Assingment - RMLSA).

Já neste artigo, o RMLSA foi divido em duas partes (R+MLSA) e foram adaptadas três diferentes heurísticas para o roteamento, apresentadas em [14], e originalmente propostas para redes de pacotes centradas em informação. Posteriormente, aplicou-se duas formulações MILP e um algoritmo adaptado de [2] para escolher o melhor roteamento baseado em um fator de trade-off, proposto aqui. O artigo está

Karcius D. R. Assis e Igor M. Queiroz, Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador-BA, Brasil, E-mail: igor.m.queiroz@ieee.org, karcius.assis@ufba.br. Raul C. Almeida Jr, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife-PE, Brasil, E-mail: ralmeida.ufpe@gmail.com.

organizado da seguinte forma: A Seção II apresenta os conceitos básicos que caracterizam o problema proposto. Na Seção III são apresentadas as heurísticas de roteamento adaptadas de [14] e utilizadas na estratégia aqui proposta. A Seção IV apresenta o modelo matemático adaptado para cálculo do consumo de potência sob restrições. Em seguida, na Seção V, o algoritmo MILP-Baseado adaptado de [2] é apresentado. Já na Seção VI são analisados os resultados das simulações. Por fim, na Seção VII são apresentadas as conclusões, seguidas pelas referências.

II. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A. *Modulação Adaptativa*

Vários autores demonstraram que a modulação-adaptativa provê uma economia considerável de recursos em redes ópticas elásticas [15-17]. Neste contexto, um dos primeiros a avaliar o real impacto dos diferentes formatos de modulação no planejamento da rede, considerando o efeito do ruído de emissão espontânea gerado pelo span entre amplificadores ópticos, foi [6].

B. *Ruído de Emissão Espontânea*

Em [6] é apresentada uma formulação MILP que considera o efeito do ruído de emissão espontânea gerado pelos amplificadores nos diversos spans da rede. Nela, assume-se que o desempenho dos sistemas de transmissão são limitados por dois fatores: (i) O acúmulo do ruído de emissão espontânea amplificada (ruído ASE), quando um sinal se propaga por um enlace; e (ii) A potência máxima finita disponível para os canais, representada pelo limiar máximo do ruído total emitido (Eqs. 9 e 10).

C. *Economia de Potência*

Neste artigo, os conceitos da modulação adaptativa e do ruído de emissão espontânea são integrados ao conceito da potência consumida pelos elementos da rede óptica elástica em um modelo matemático adaptado de [2], que será descrito na seção IV. O modelo proposto considera os amplificadores (Eq. 16), transceptores (Eq. 14) e OXCs (Eq. 11) como os componentes da camada física com maior influência no consumo de potência, assim como em [18-20].

III. HEURÍSTICAS DE ROTEAMENTO

Em [14] são apresentadas três heurísticas para roteamento, que serão utilizadas neste trabalho. São elas:

- **MFMC** (Multicommodity Flow with Minimum Congestion): É um problema LP. Assume-se que o tráfego associado à demanda de tráfego de um nó i a um nó j pode ser infinitesimalmente dividido entre o conjunto de possíveis caminhos ópticos, L_{ij}, entre os nós fonte e destino. O MFMC tem aplicação limitada nos sistemas de comunicação atuais, já que não é prático dividir as demandas por diferentes caminhos. Porém, é um método que provê bom desempenho em relação à capacidade residual de espectro numa rede.
- **IMFMC** (Integer Multicommodity Flow with Minimum Congestion): Em particular, protocolos da camada de transporte, como o TCP, sofrem de baixo desempenho se o caminho é fracionado. Estratégia de roteamento que permitem balanceamento de carga por múltiplos caminhos ópticos tipicamente alocam sessões TCP individuais. Consequentemente, nas redes de comunicação, geralmente é assumido que não é possível dividir os fluxos. Dessa forma, surge o problema MFMC Inteiro (IMFMC).
- **SPR** (Shortest-Path Routing): Roteamento pelo caminho mais curto, para fins de comparação com as demais heurísticas.

IV. MODELO MATEMÁTICO ADAPTADO

Uma rede SLICE com múltiplos formatos de modulação provê um trade-off entre o alcance do caminho óptico, e o número de slots demandados na rede. O modelo proposto em [6] quantifica este trade-off e o chamaremos de "formulação tradicional", para fins de comparação. Uma vez alcançado o objetivo primário desta formulação, que é maximizar a demanda atendida (max Ca), ou seja, reduzir ao máximo a probabilidade de bloqueio (P_{bloq}), o próximo passo é minimizar a potência consumida na rede utilizando max Ca como entrada no modelo. Para isto, em [2] foi introduzido um novo modelo, que chamaremos de "formulação modificada", o qual foi adaptado neste artigo para ser utilizado em conjunto com as heurísticas apresentadas na seção anterior. Ele é descrito a seguir:

A. *Notação*

- i e j representam os nós fonte e destino, respectivamente, de um caminho óptico de banda variável (Em termos de slots).
- m e n representam os nós origem e destino de um enlace físico da rede.
- z representa o formato de modulação.
- p representa o caminho óptico pertencente ao conjunto de caminhos ópticos, L_{ij},utilizados para dividir uma demanda i-j.

B. *Dados*

- N: Número de nós da rede.
- Λ_{ijp}: Matriz de tráfego, que representa a intensidade de tráfego (bps) entre um nó fonte i e nó destino j, utilizando o caminho óptico p.
- d_{mn}: Topologia física, que representa a distância da fibra que conecta os nós m e n.
- MS: Capacidade de cada fibra, dada pelo número máximo de slots por enlace.
- FGB: Banda de guarda, que é a largura spectral mínima entre bandas (em termos de slots).
- Ω : Largura de um slot em Hz.
- E(z)max: Limite do ruído de emissão espontânea acumulado em um sinal com formato de modulação z.
- l: Comprimento do vão de fibra entre dois amplificadores.
- f(l): Ruído ASE produzido por um amplificador para compensar o span de comprimento l.
- ε_z: Eficiência spectral (bps/Hz) para o formato de modulação z.
- K: Um grande número para auxiliar algumas variáveis inteiras.
- PC_{OXC_m}: Potência consumida pelo OXC_m.
- PC_{amp}: Potência consumida por cada amplificador óptico.
- N_{amp}: Número de amplificadores na rede.
- Gf_{mn}: Variável binária usada para contar o grau do nó m.

- N_m: Grau físico do nó m (número de fibras conectadas ao nó)
- α: Grau virtual do OXC (número de canais que podem ser inseridos/retirados)
- A probabilidade de bloqueio:
  P_{block} = 1- (max(C_a)/ C_r), (1)
  em que max(C_a) é a demanda atendida obtida após rodar o MILP tradicional e C_r é a demanda total requisitada na rede.
- A_{mn}^{ijzp}: Parâmetro obtido após o roteamento pelas heurísticas. Indica se o caminho óptico p, do nó i ao nó j, com formato de modulação z, passa pelo enlace m-n.

C. Variáveis

- b_{ijzp}: Largura de banda, em termos de número de slots, de um caminho óptico p, do nó i ao nó j, com formato de modulação z.
- P_{mn}^{ijzp}: Roteamento na topologia física. Largura de banda de um caminho óptico p, do nó i ao nó j, com formato de modulação z, utilizando o enlace m-n.
- f_{ijzp}: O ruído ASE de um caminho óptico p, do nó i ao nó j, com formato de modulação z.
- M_{ijzp}: Uma variável binária, que indica qual dos formatos de modulação z é usado no caminho óptico p, do nó i ao nó j.
- TR_{ijzp}: Taxa de transmissão do transceptor associado ao caminho óptico p, do nó i ao nó j, com formato de modulação z.
- $PC_{OFDM_{ijzp}}$: Potência consumida por cada transceptor de banda variável (BV)
- PC_{total}: Potência total consumida na rede.

D. Formulação MILP adaptada

Minimize:

$$PC_{total} = \sum_m PC_{OXC_m} + \sum_{ijp}\left[\sum_z PC_{OFDM_{ijzp}}\right] + N_{amp} * PC_{amp} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_n P_{mn}^{ijzp} - \sum_n P_{nm}^{ijzp} = \begin{cases} b_{ijzp} & \text{if } m = i \\ -b_{ijzp} & \text{if } m = j \\ 0 & \text{if } m \neq i, j \end{cases} \quad \forall\, m,i,j,z,p \quad (3)$$

$$\sum_{ij}(P_{mn}^{ijzp} + FGB.\, A_{mn}^{ijzp}) \leq MS \quad \forall\, m,n,z,p \quad (4)$$

$$A_{mn}^{ijzp} \geq P_{mn}^{ijzp}/M \quad \forall\, i,j,m,n,z,p \quad (5)$$

$$M_{ijzp} \geq b_{ijzp}/M \quad \forall\, i,j,z,p \quad (6)$$

$$\sum_z M_{ijzp} \leq 1 \quad \forall\, i,j,p \quad (7)$$

$$b_{ijzp} \geq M_{ijzp} * \Lambda_{ijp} * (1/\varepsilon_z) * (1/\Omega) \quad \forall\, i,j,z,p \quad (8)$$

$$\sum_{mn}[(A_{mn}^{ijzp} * d_{mn})/l] * f(l) = f_{ijzp} \quad \forall\, i,j,z,p \quad (9)$$

$$f_{ijzp} \leq E(z)max \quad \forall\, i,j,z,p \quad (10)$$

$$PC_{OXC_m} = N_m * 85 + \alpha * 100 + 150\ W \quad \forall\, m \quad (11)$$

$$Gf_{mn} = \begin{cases} 1, & d_{mn} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall\, m,n \quad (12)$$

$$N_m = \sum_n Gf_{mn} \quad \forall\, m \quad (13)$$

$$PC_{OFDM_{ijzp}} = 1.683 * TR_{ijzp} + M_{ijzp} * 91.333\ W \quad (14)$$

$$TR_{ijzp} = M_{ijzp} * \varepsilon_z * \Omega \quad \forall\, i,j,z,p \quad (15)$$

$$PC_{amp} = 30\ [W] \quad (16)$$

$$N_{amp} = \sum_{mn} d_{mn}/l_{amp} \quad (17)$$

$$A_{mn}^{ijzp} = M_{ijzp} * A_{mn}^{ijp} \quad \forall\, i,j,m,n,z,p \quad (18)$$

V. Algoritmo MILP-Baseado Adaptado

Nesta seção, é apresentado um algoritmo adaptado de [2] (Fig. 1) para resolução de diferentes objetivos de otimização utilizando as heurísticas e as formulações MILP anteriormente apresentadas em passos subsequentes (min MS, max Ca, min P_{total}), sendo que MS é o número máximo de sub-portadoras em um enlace físico da rede.

Passo 0: Rodar as heurísticas de roteamento para obter o parâmetro A_{mn}^{ijp} para cada uma.
Passo 1: Rodar formulação tradicional para achar o valor de [min MS] e $PC_{tradicional}$, tendo como parâmetro P_{bloq};
Passo 2: Com o valor de [min MS] rodar formulação tradicional para achar o valor da função objetivo [max Ca];
Passo 3: Com os valores de [min MS] e [max Ca] rodar formulação modificada para achar o valor da nova função objetivo [min $PC_{modificado}$];
Passo 4: Calcular ΔPC = [$PC_{tradicional}$ - $PC_{modificado}$], e ΔPC_{perc} = [ΔPC/$PC_{tradicional}$].
Passo 5: Escolher a melhor heurística baseado no fator de trade-off, ***$F_{trade\text{-}off}$ = [$PC_{modificado}$. MS]/[ΔPC_{perc} .10^t]**, em que t é um número inteiro usado para normalizá-lo.
*O fator de trade-off foi ajustado empiricamente com o fito de analisar a relação entre a potência consumida, utilização de slots e a economia percentual de potência obtidas pelas heurísticas.

Fig. 1 Algoritmo MILP-Baseado adaptado de [2]

No Passo 0, obtém-se o parâmetro A_{mn}^{ijp} pela heurística de roteamento. No Passo 1, é encontrado o valor mínimo de MS de forma a atender a probabilidade máxima de bloqueio definida (P_{bloq}), e o valor da potência consumida através da formulação tradicional ($PC_{tradicional}$). O Passo 2 obtém o valor de max Ca para ser utilizado como parâmetro no Passo 3. No Passo 3 é obtido o valor da potência consumida com a formulação modificada ($PC_{modificado}$) e no Passo 4 é calculada a economia de potência absoluta (ΔPC) e economia percentual (ΔPC_{perc}). Por fim, no Passo 5 é escolhida a melhor heurística através do fator de trade-off. Quanto menor o fator, melhor é o tipo de roteamento.

VI. Simulações e Resultados

As simulações foram feitas em redes de pequena (Lattice) e de grande dimensão (NSFNET), utilizando a linguagem de programação AMPL sob a plataforma de simulação IBM ILOP CPLEX Optimization Studio v.12.5, com um processador Intel Core I5-3230M, 2.60 GHz, 4G RAM, e sistema operacional Windows 10, 64 bits. Elas foram limitadas a 5 minutos. Os resultados serão apresentados a seguir.

A. *Rede Pequena*

Para avaliar a efetividade do problema proposto, utilizou-se uma topologia física de 6 nós e 7 enlaces com distância entre nós de 1000 km (Fig. 2).

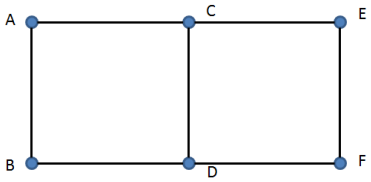
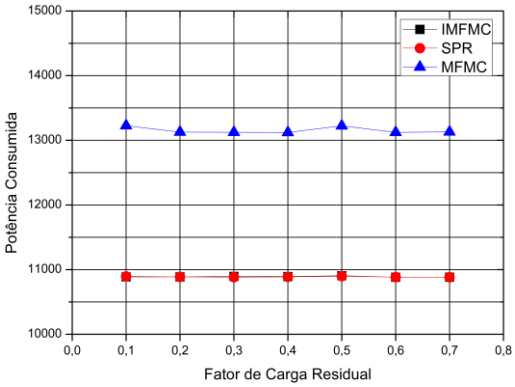


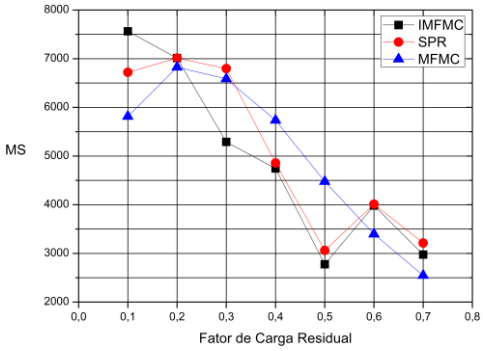
Fig. 2 Topologia física da rede Lattice.

É assumido que há um par de fibras bidirecionais em cada enlace, a banda de guarda é FGB = 1 slot, a largura espectral do slot é Ω = 12.5 GHz. A demanda de tráfego requisitada é não uniforme para cada par fonte-destino e varia de forma inversamente proporcionalmente ao fator de carga residual (Fator que define a porcentagem da carga requisitada que não é transportada). A distância entre amplificadores é l = 100 km, com ruído de emissão espontânea normalizado f(l) = 1 W. O parâmetro de normalização do fator de trade-off é t = 10. Foram utilizados 3 formatos de modulação diferentes (M_1 = BPSK, M_2 = QPSK e M_3 = 16-QAM) com eficiências espectrais $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 2$ e $\varepsilon_3 = 4$ (bps/Hz), sendo que o limiar de ruído para cada modulação é $E(1)_{max}$ = 50, $E(2)_{max}$ = 30, $E(3)_{max}$ = 20 W. O grau virtual do OXC (α) foi considerado igual a 3. Definiu-se a probabilidade de bloqueio máxima em 0%

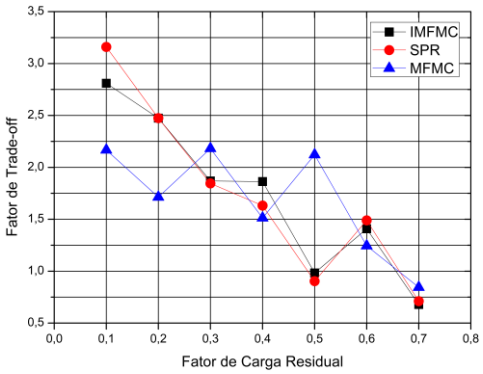
A Fig. 3 (a) mostra a potência consumida em função do fator de carga residual para as 3 heurísticas apresentadas. Percebe-se claramente que o algoritmo MFMC consome mais potência. Isto é devido à maior utilização de caminhos ópticos para dividir as demandas. Em compensação, pode ser visto na Fig. 3 (b), que o MFMC apresenta uma tendência de menor utilização de slots (MS), na maioria dos pontos analisados. Já a Fig. 3 (c) ilustra o fator de trade-off. Quanto menor este fator, melhor é a heurística. Agora, o MFMC apresenta o melhor resultado em quatro dos sete pontos analisados. Essa tendência será analisada na sequência, para uma rede moderada.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Rede Lattice: (a) Potência consumida; (b) Utilização de slots (MS); (c) Fator de trade-off.

B. *Rede Moderada*

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações para a rede moderada hipotética, NSFNET (Fig. 4).

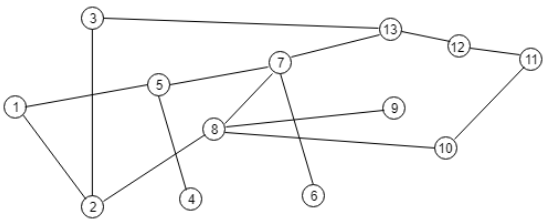
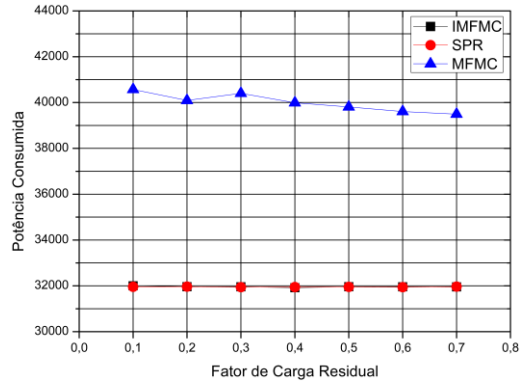


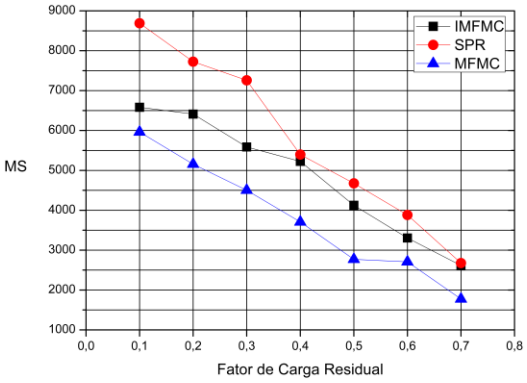
Fig. 4 Topologia física da NSFNET.

Para a NSFNET, os limites de ruído são $E(1)_{max}$ = 800, $E(2)_{max}$ = 600, $E(3)_{max}$ = 300 W. Os demais parâmetros, por ora não especificados, são os mesmos utilizados para a 6NET na subseção anterior. A probabilidade de bloqueio máxima foi definida em 0%, ou seja, todas as requisições devem ser atendidas.

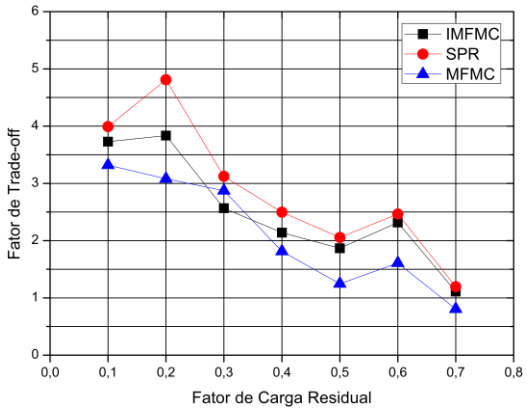
A Fig. 5 (a) mostra a potência consumida para as 3 heurísticas e mais uma vez o MFMC implica maior consumo, devido à maior utilização de transceptores. Já na Fig. 5 (b), o MFMC resultou em menor utilização de slots (MS), aumentando a capacidade residual da rede. Por fim, o fator de trade-off, ilustrado na Fig 5 (c), confirma a tendência da rede anterior e mostra que o MFMC é a melhor heurística dentre as apresentadas em praticamente todos os pontos analisados (6/7).



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Rede NSFNET: (a) Potência consumida; (b) Utilização de slots (MS); (c) Fator de trade-off.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma nova estratégia de roteamento para redes ópticas elásticas sob modulação adaptativa e restrições da camada física que considera a potência consumida pelos seus elementos físicos, cujo objetivo é analisar o trade-off entre a potência total consumida pela rede e a utilização de espectro/slots, enquanto mantém a probabilidade de bloqueio abaixo de um limiar pré-definido. Para isso, foram utilizadas três heurísticas, uma formulação MILP modificada e um algoritmo sequencial adaptado.

As simulações comprovaram a eficiência da estratégia proposta e mostraram que a utilização da heurística MFMC, apesar de resultar em maior consumo de potência, provê maior capacidade residual de slots na rede, fator de extrema relevância para o planejamento de redes estáticas e, principalmente, dinâmicas. Para redes maiores, a estratégia se torna inviável, uma vez que a complexidade do MILP aumenta rapidamente. Neste contexto, novas heurísticas/meta-heurísticas deverão ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

[1] Assis, K. D. R., Jr, R. A., & Waldman, H. (2012). Um novo esquema de proteção com economia de banda em Redes Óptica Elásticas.XXX SBrT

[2] Queiroz, I. M., & Assis, K. D. R. (2017, September). A MILP-based algorithm for energy saving in spectrum-sliced elastic optical networks. In Computer Science and Electronic Engineering (CEEC).IEEE.

[3] Chatterjee, B. C., Sarma, N., & Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(3), 1776-1800.

[4] Assis, K. D. R., Queiroz, I., Almeida, R. C., & Waldman, H. (2013, August). MILP formulation for resource optimization in spectrum-sliced elastic optical path networks. In Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International (pp. 1-4).

[5] Queiroz, I. M., & Assis, K. D. (2012). Redes Ópticas Elásticas: Planejamento e Otimização. Proc. CSBC.

[6] Assis, K. D. R., Almeida, R. C., Cartaxo, A. V. T., dos Santos, A. F., & Waldman, H. (2014, August). Flexgrid optical networks design under multiple modulation formats. In Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International (pp. 1-5). IEEE.

[7] Assis, K. D. R., dos Santos, A. F., & Queiroz, I. M. (2017, January). Routing in EON networks under mixed static and dynamic traffic. In Optical Metro Networks and Short-Haul Systems IX (Vol. 10129, p. 1012908). International Society for Optics and Photonics.

[8] Hadi, M., & Pakravan, M. R. (2018). Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 10(2), 90-103.

[9] Zhang, L., Han, T., & Ansari, N. (2018). Energy-Aware Virtual Machine Management in Inter-datacenter Networks over Elastic Optical Infrastructure. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2(1), 305-315.

[10] Bandiri, S. Y. M., Pimenta, T. C., & Spadoti, D. H. (2018). Adaptive Modulation and code Strategy to Reduce Energy Consumption in Elastic Optical Network. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMOe), 17(1), 65-84.

[11] Xiong, Y., Shi, J., Yang, Y., Lv, Y., & Rouskas, G. N. (2018). Lightpath Management in SDN-Based Elastic Optical Networks With Power Consumption Considerations. Journal of Lightwave Technology, 36(9), 1650-1660.

[12] Natalino, C., Chiaraviglio, L., Idzikowski, F., Wosinska, L., & Monti, P. (2018). Joint Optimization of Failure Management Costs, Electricity Costs, and Operator Revenue in Optical Core Networks. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2(1), 291-304.

[13] Saha, A. K., Sambyo, K., & Bhunia, C. T. (2018). Energy efficient modelling of a network. China Communications, 15(1), 107-117.

[14] Reed, M. J. (2012, June). Traffic engineering for information-centric networks. ICC, pp. 2660-266. IEEE.

[15] Takagi, T., Hasegawa, H., Sato, K. I., Sone, Y., Kozicki, B., Hirano, A., e Jinno, M. (2011, March). Dynamic routing and frequency slot assignment for elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In Optical Fiber Communication Conference. OSA.

[16] Palkopoulou, E., Angelou, M., Klonidis, D., Christodoulopoulos, K., Klekamp, A., Buchali, F., e Tomkos, I. (2012). Quantifying spectrum, cost, and energy efficiency in fixed-grid and flex-grid networks [Invited]. Journal of Optical Communications and Networking, 4(11),

[17] Nag, A., Tornatore, M., e Mukherjee, B. (2010). Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats. Lightwave Technology, Journal of, 28(4), 466-475.

[18] Vizcaino, J. L., Ye, Y., Lopez, V., Jimenez, F., Duque, R., Musumeci, F., e Krummrich, P. (2013, March). Differentiated quality of protection to improve energy efficiency of survivable optical transport networks. In Optical Fiber Communication Conference (pp. OM3A-1). OSA.

[19] Zhang, J., Zhao, Y., Zhang, J., & Mukherjee, B. (2014, March). Energy efficiency of IP-over-elastic optical networks with sliceable optical transponder. In Optical Fiber Communication Conference. OSA.

[20] Fallahpour, A., Beyranvand, H., Nezamalhosseini, S. A., & Salehi, J. (2014). Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks. Lightwave Technology, Journal of, 32(10), 2019-2027.